

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.03.014

竖向地震作用下层间隔震结构的动力反应研究

胡岳¹, 汪权^{1,2}, 汤涛³

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程防灾减灾安徽省工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009;
3. 安徽省桐城市规划建筑设计院, 安徽 安庆 231400)

摘要:文章针对竖向地震作用下高层结构隔震层位置变化对结构竖向动力反应的影响问题,研究 5 种层间隔震结构分别在 3 种竖向地震作用下的竖向动力反应。以国际平台的 20 层 Benchmark 钢结构模型为基准模型,利用 ANSYS 软件建立隔震层分别位于第 1 层、第 3 层、第 5 层、第 7 层和第 9 层的层间隔震结构有限元数值模型,对比分析 5 种层间隔震结构分别在竖向 ElCentro 波、竖向 Taft 波、竖向天津波作用下的楼层竖向位移、楼层位移角、楼层竖向加速度和基底轴力等竖向动力反应。结果表明:在竖向地震作用下,楼层竖向位移和楼层位移角控制效果较差,甚至会出现增大的现象,基底轴力具有较小的控制效果;随着隔震层位置的升高,楼层竖向加速度和基底轴力均逐渐增大,但当隔震层位于第 9 层时,楼层竖向加速度和基底轴力相较于隔震层位于第 7 层时有一定的减小。该研究成果可用于考虑竖向地震作用的高层结构抗震设计。

关键词:层间隔震结构; Benchmark 模型; 竖向地震作用; 竖向动力反应

中图分类号: TU973.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)03-0373-06

Dynamic responses of inter-story isolation structure under vertical earthquake action

HU Yue¹, WANG Quan^{1,2}, TANG Tao³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Engineering Technology Research Center for Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Hefei 230009, China; 3. Tongcheng Planning and Architectural Design Institute of Anhui Province, Anqing 231400, China)

Abstract: Aiming at the influence of the position change of the isolation layer on the vertical dynamic responses of high-rise structure under vertical earthquake action, the vertical dynamic responses of the five kinds of inter-story isolation structures under three kinds of vertical seismic waves are studied in this paper. Taking the Benchmark twenty-story steel structure model of the international platform as the standard model, the finite element numerical models of isolation structures of the first, third, fifth, seventh and ninth stories are established by ANSYS software. Then, the vertical dynamic responses of the five kinds of inter-story isolation structures under vertical ElCentro wave, vertical Taft wave and vertical Tianjin wave, such as vertical story displacement, story displacement angle, vertical story acceleration and axial force of the base, are compared and analyzed. The results show that under the action of vertical earthquake, the control effect on vertical story displacement and story displacement angle is poor, and even they will increase, and the control effect on the axial force of the base is small; the vertical story acceleration and the axial force of the base increase gradually with the rise of the isolation layer, but when the isolation layer is located in the ninth story, the vertical story acceleration and the axial force of the base decrease to some extent compared with those with the isolation layer located in the seventh story. The research results of this paper can be used in structural seismic

收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878234)

作者简介: 胡岳(1994—), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学硕士生;

汪权(1981—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师。

design of high-rise buildings considering vertical earthquake action.

Key words: inter-story isolation structure; Benchmark model; vertical earthquake action; vertical dynamic response

地震作用大多为水平和竖向共同震动的结果。在高层建筑中,因为结构的水平向刚度较小,所以较多的地震灾害是由水平地震作用引起的。然而近几十年的地震灾害记录表明,在地震中心区域,竖向地震作用也能对结构产生较大的破坏,甚至出现竖向地震作用的加速度峰值大于水平地震作用的加速度峰值^[1]。

文献[2]研究水平地震作用和竖向地震作用同时作用在廊桥主拱圈和上部建筑结构柱的地震响应,得到桥梁结构与建筑结构耦合作用的效果;文献[3]研究竖向地震作用下的钢-钢筋混凝土塔式太阳能发电组合结构的抗震性能,表明同等水准下水平向地震作用加速度最大值的出现时间比竖向地震作用加速度最大值的晚,而且塔顶在竖向的位移变化不明显;文献[4]研究不同地震区和场地类型对火力发电厂主厂房的钢屋架的竖向地震影响,给出不同参数的钢屋架竖向地震作用系数表;文献[5]研究竖向地震作用下钢筋混凝土建筑与土结构相互作用效应,发现在地震反应分析中考虑柔性基础,将对结构的整体反应产生有利的影响。

层间隔震结构是指在高层建筑某个楼层的顶部设置隔震装置,从而形成隔震层的一种隔震技术。隔震层将结构分为上下 2 个部分,同时隔震层可以消耗大量的地震能量,能有效降低地震向上传输的能量。建筑层间隔振技术最早起源于日本,日本学者提出一个结构基础隔震的概念,日本东京的帝国饭店^[6]是历史上第一栋采用建筑隔震技术建造出来的高层建筑。文献[7]研发了铅芯叠层橡胶支座,建造了世界上第一栋使用铅芯橡胶支座的隔震建筑。经过百余年的研究,建筑隔震技术日趋成熟,在发展过程中取得了丰硕的研究成果。

尽管层间隔震结构在水平地震作用下动力反应的相关研究已经相当丰富,且文献[8-9]研究表明其在水平减振方面具有良好的控制效果。但是在竖向地震作用下,层间隔震结构的竖向动力反应分析研究相对较少。

本文以美国加州工程师协会设计的 20 层 Benchmark 钢结构设计模型为基本研究模型,利用 ANSYS 软件分别建立隔震层位于第 1 层、

第 3 层、第 5 层、第 7 层和第 9 层的层间隔震结构有限元模型,分别研究 5 种层间隔震结构在竖向 ElCentro 波、竖向 Taft 波和竖向天津波 3 种典型竖向地震作用下的竖向动力反应。

1 Newmark 法基本理论

本文的数值计算采用文献[10]中的 Newmark 完全法,该方法没有进行矩阵的缩减,同时该方法可以应用于各种非线性特性分析中,所有节点的位移和应力数值一次求解可以全部得到。

在 Newmark 法加速度假设的基础上,考虑到稳定算法和提高运算精度,假定 δ 、 β 2 个积分控制参数在 t_s 到 t_{s+1} 微时间段上对加速度积分,可以得到 t_{s+1} 时刻位移和速度的表达式如下:

$$\mathbf{r}_{s+1}(t) = \mathbf{r}_s(t) + \dot{\mathbf{r}}_s(t)\Delta t + \left\{ \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{r}}_s(t) + \beta[\ddot{\mathbf{r}}_{s+1}(t) - \ddot{\mathbf{r}}_s(t)] \right\} \Delta t^2 \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{s+1}(t) = \dot{\mathbf{r}}_s(t) + \{ \ddot{\mathbf{r}}_s(t) + \delta[\ddot{\mathbf{r}}_{s+1}(t) - \ddot{\mathbf{r}}_s(t)] \} \Delta t \quad (2)$$

其中: $\mathbf{r}_s(t)$ 为第 t_s 时刻的 $n \times 1$ 阶位移矩阵; $\mathbf{r}_{s+1}(t)$ 为第 t_{s+1} 时刻的 $n \times 1$ 阶位移矩阵; $\dot{\mathbf{r}}_s(t)$ 为第 t_s 时刻的 $n \times 1$ 阶速度矩阵; $\dot{\mathbf{r}}_{s+1}(t)$ 为第 t_{s+1} 时刻的 $n \times 1$ 阶速度矩阵; $\ddot{\mathbf{r}}_s(t)$ 为第 t_s 时刻的 $n \times 1$ 阶加速度矩阵; $\ddot{\mathbf{r}}_{s+1}(t)$ 为第 t_{s+1} 时刻的 $n \times 1$ 阶加速度矩阵; Δt 为第 t_s 时刻与第 t_{s+1} 的时间间隔; n 为节点数。

将 $\dot{\mathbf{r}}_{s+1}(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{r}}_{s+1}(t)$ 视为变量,由式(1)、式(2)可得 t_{s+1} 时刻速度和加速度的求解公式,即

$$\dot{\mathbf{r}}_{s+1}(t) = \frac{\delta}{\beta\Delta t}[\mathbf{r}_{s+1}(t) - \mathbf{r}_s(t)] + \left(1 - \frac{\delta}{\beta}\right)\dot{\mathbf{r}}_s(t) + \Delta t\left(1 - \frac{\delta}{2\beta}\right)\ddot{\mathbf{r}}_s(t) \quad (3)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{s+1}(t) = \frac{1}{\beta\Delta t^2}[\mathbf{r}_{s+1}(t) - \mathbf{r}_s(t)] - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{\mathbf{r}}_s(t) - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{\mathbf{r}}_s(t) \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入瞬态动力学控制方程,可得:

$$\bar{\mathbf{K}}\mathbf{r}_{s+1}(t) = \bar{\mathbf{P}}_{s+1}(t),$$

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{\delta}{\beta\Delta t}\mathbf{C},$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{s+1}(t) = \mathbf{P}_{s+1}(t) + \mathbf{M}\left[\frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{r}_s(t) + \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{\mathbf{r}}_s(t) + \right.$$

$$\left(\frac{1}{2\beta}-1\right)\ddot{\mathbf{r}}_s(t)\Big] + \mathbf{C}\left[\frac{\delta}{\beta\Delta t}\dot{\mathbf{r}}_s(t) + \left(\frac{\delta}{\beta}-1\right)\dot{\mathbf{r}}_s(t) + \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\beta}-2\right)\ddot{\mathbf{r}}_s(t)\right] \quad (5)$$

其中: \mathbf{K} 为第 t_s 时刻的 $n \times n$ 阶刚度矩阵; \mathbf{M} 为第 t_s 时刻的 $n \times n$ 阶质量矩阵; \mathbf{C} 为第 t_s 时刻的 $n \times n$ 阶阻尼矩阵; $\mathbf{P}_{s+1}(t)$ 为第 t_{s+1} 时刻的 $n \times 1$ 阶荷载矩阵; $\bar{\mathbf{K}}$ 为第 t_{s+1} 时刻的 $n \times n$ 阶刚度矩阵; $\bar{\mathbf{P}}_{s+1}(t)$ 为第 t_{s+1} 时刻的 $n \times n$ 阶荷载矩阵。

因为 t_s 时刻的有关变量值是确定的,所以根据式(5)可以得到 t_{s+1} 时刻的结构位移,然后将得到的位移值代入式(3)、式(4),可得 t_{s+1} 时刻的速度和加速度,在每个微时段上循环以上步骤,最终可以得到结构在所有时间点上瞬态动力的结果。为了保持 Newmark 算法的稳定, δ 、 β 应该符合如下关系式:

$$\begin{cases} \beta \geq \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2} + \delta\right), \\ \delta \geq \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2} + \beta + \delta > 0 \end{cases} \quad (6)$$

2 Benchmark 基准模型

本文选用第3阶段的20层钢结构 Benchmark 模型为研究对象,该模型是美国加州工程师协会计划设计的真实钢结构,虽然该结构没有建成,但其依然是抗震设计中典型中高层钢结构的代表,对其进行研究具有非常实用的价值。

2.1 Benchmark 有限元模型

20层钢结构 Benchmark 模型的平面布置、尺寸、材料、地震质量等详细参数见文献[11]。以整体钢结构南北方向的一榀框架为分析对象,采用 ANSYS 有限元软件建立该模型的有限元数值分析模型。

在 Benchmark 有限元数值模型中,梁和柱均采用 beam 23 单元,在 beam 23 单元的实常数设置中,将截面类型设置为通用截面。将梁和柱单元的本构关系设置为双线性随动强化模型,本构关系是通过设置材料的弹性模量、屈服应力和切线模量定义的。将梁单元的弹性模量、屈服强度、切线模量分别设置为 2.06×10^{11} 、 2.48×10^8 、 2.06×10^9 Pa,柱单元的弹性模量、屈服强度、切线模量分别设置为 2.06×10^{11} 、 3.45×10^8 、 2.06×10^9 Pa。

2.2 Benchmark 数值模型的正确性

在我国的相关抗震规范中规定,模态分析中

主要模态的阶数取决于振型的质量参与系数,当振型的累积质量参与系数超过90%即为主要模态,通过 ANSYS 的模态分析可知,建立的 Benchmark 数值模型的前5阶模态的累积质量参与系数达到98%,因此取前5阶模态的自振频率来验证 Benchmark 数值模型的正确性。将 ANSYS 模态分析获得 Benchmark 数值模型的前5阶自振频率与美国土木工程师协会采用 MATLAB 进行数值分析的计算结果对比,见表1所列。从表1可以看出,数值计算结果基本一致,因此建立的 Benchmark 有限元模型是有效的,可以用于后续的研究分析。

表1 数值模型的自振频率对比 单位:Hz

阶次	1	2	3	4	5
MATLAB 软件	0.26	0.75	1.30	1.83	2.40
ANSYS 软件	0.26	0.76	1.30	1.83	2.41

3 5种层间隔震结构设计

层间隔震结构的隔震层一般是在相应楼层的柱顶设置隔震支座,在 ANSYS 中没有能够直接模拟隔震支座的单元,因此需要根据隔震支座的力学特点进行简化模拟。在 ANSYS 中可以用弹簧单元中的 combin 14 单元来模拟隔震支座的竖向力学特点,用 combin 40 单元来模拟隔震支座的横向力学特点,将 combin 14、combin 40 单元连接到同一个节点上,可以完成对隔震支座的有限元模拟。根据结构的质量以及确保在地震作用下具有足够的初始刚度来确定 combin 14、combin 40 单元的实常数;combin 14 单元实常数设置为 3.35×10^9 、0.272;combin 40 单元实常数设置为 3×10^6 、0.272、0、0、 1×10^5 、 1×10^6 。

为了研究层间隔震结构的隔震层位置变化对结构竖向动力反应的影响,设计5种不同隔震层位置的层间隔震结构的有限元模型。在实际工程案例中,隔震层的位置不宜过高,因为隔震层设置在较高的位置会降低下部结构的减振效果,综合考虑整体结构竖向的减振效果,将层间隔震结构的隔震层位置设置在20层钢结构地上部分的第1层、第3层、第5层、第7层和第9层的柱顶。无控结构和5种层间隔震结构的模型示意图如图1所示。利用 ANSYS 软件分别建立上述无控结构和5种层间隔震结构的有限元数值模型用以进行后续的动力分析。

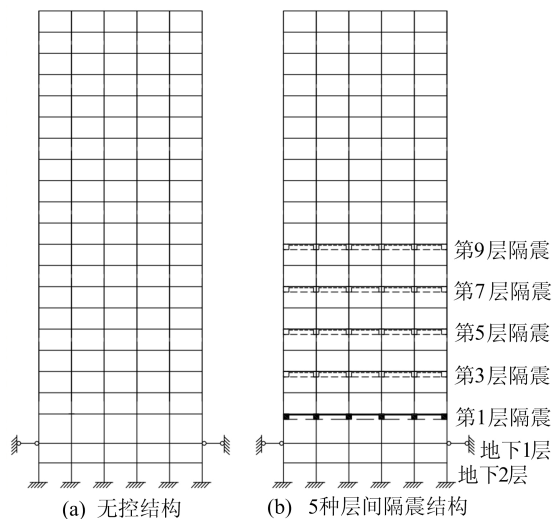


图 1 无控结构和 5 层间隔离震结构模型示意图

4 竖向地震作用动力时程分析

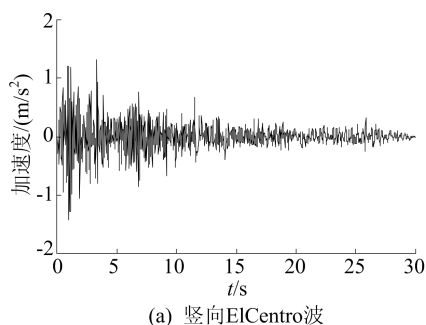
4.1 竖向地震波的选取和调整

本文的地震作用输入选取 3 条典型的天然竖向地震波用来进行时程分析。竖向 ElCentro 波、竖向 Taft 波、竖向天津波的峰值加速度和持续时间以及采样步长见表 2 所列。

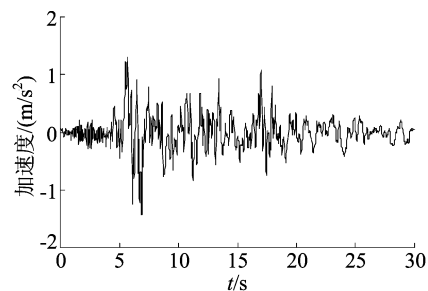
表 2 3 种竖向地震波的相关参数

地震波	竖向 ElCentro 波	竖向 Taft 波	竖向 天津波
峰值加速度/(m/s ²)	2.101	1.168	0.731
持续时间/s	30.00	30.00	19.12
采样步长/步	1 500	1 500	1 912
调整系数	0.681	1.224	1.956

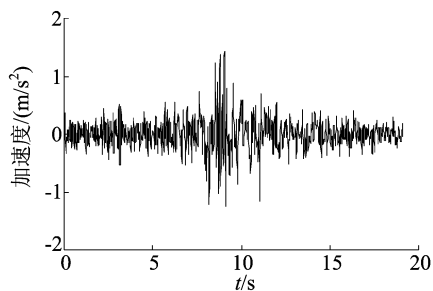
为统一分析对比结构的竖向动力反应,将 3 种竖向地震波的峰值加速度分别按比例调整至 7 度罕遇竖向地震的峰值加速度,即 $a_{max} = 1.43 \text{ m/s}^2$ 。3 种调整后的竖向地震波加速度时程曲线如图 2 所示。



(a) 竖向ElCentro波



(b) 竖向Taft波



(c) 竖向天津波

图 2 3 种竖向地震波加速度时程曲线

4.2 动力反应评价指标

本文选取结构的楼层竖向位移、楼层位移角和基底最大轴力 3 个竖向动力响应作为竖向动力反应指标,为了评价竖向地震作用下隔震层位置变化对结构竖向动力反应的影响,引入 J_1 、 J_2 、 J_3 3 个竖向动力反应评价指标,即

$$J_1 = \max \left\{ \frac{\max |X_i(t)|}{|X_i^{\max}|} \right\},$$

$$J_2 = \max \left\{ \frac{\max \frac{|X_i(t)|}{b}}{|\delta_i^{\max}|} \right\},$$

$$J_3 = \max \left\{ \frac{\max |F_s(t)|}{|F_s^{\max}|} \right\}.$$

其中: $i = 1, 2, \dots, n$; $|X_i(t)|$ 为有控状态下第 i 层竖向位移的绝对值; b 为楼层跨度; $|X_i^{\max}|$ 、 $|\delta_i^{\max}|$ 分别为无控状态下结构第 i 层竖向位移绝对值的峰值和楼层位移角绝对值的峰值; $|F_s(t)|$ 为有控状态下的底层轴力绝对值的峰值; $|F_s^{\max}|$ 为无控状态下底层轴力绝对值的峰值。

4.3 结构动力反应分析

根据上节定义的评价指标,将本文 5 种层间隔离震结构的竖向动力反应进行比较,3 个评价指标见表 3 所列。

从表 3 可以得到以下结论:

1) 竖向地震作用下, J_1 最小为无控结构的 99.62%, J_2 最小为无控结构的 108.26%, 楼层竖向位移和楼层位移角控制效果较差,甚至会出现增大的现象,因为隔震层本身具有一定的刚度和

阻尼,可以储存较大的竖向地震作用能量,所以隔震层所在的楼层竖向位移和楼层位移角会增大。

2) 3 个指标中 J_3 的控制效果最明显,最小为无控结构的 93.73%,即隔震层的设置可以控制结构的基底轴力,主要是因为隔震层将结构分为上、下 2 个部分,使得结构的刚度分布发生变化,进而引起柱轴力分配的变化。

表 3 5 种隔震结构竖向动力反应评价指标 %

隔震结构	评价指标	竖向 ElCentro 波	竖向 Taft 波	竖向 天津波
第 1 层	J_1	122.57	123.50	122.68
	J_2	112.10	113.35	112.23
	J_3	94.23	94.95	93.73
第 3 层	J_1	105.31	106.73	105.37
	J_2	125.66	127.92	126.23
	J_3	97.92	99.21	97.27
第 5 层	J_1	103.57	105.15	103.34
	J_2	119.59	121.88	121.66
	J_3	100.54	101.99	100.22
第 7 层	J_1	105.10	107.02	106.69
	J_2	117.13	119.45	121.88
	J_3	103.71	105.45	103.46
第 9 层	J_1	99.31	99.92	99.62
	J_2	108.42	108.92	108.26
	J_3	98.69	99.22	98.97

为了进一步比较竖向地震作用下 5 种层间隔震结构的竖向动力反应效果,结构的最大楼层竖向加速度和边柱基底轴力时程曲线分别如图 3、图 4 所示。

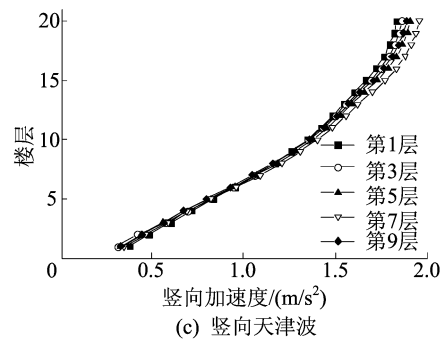
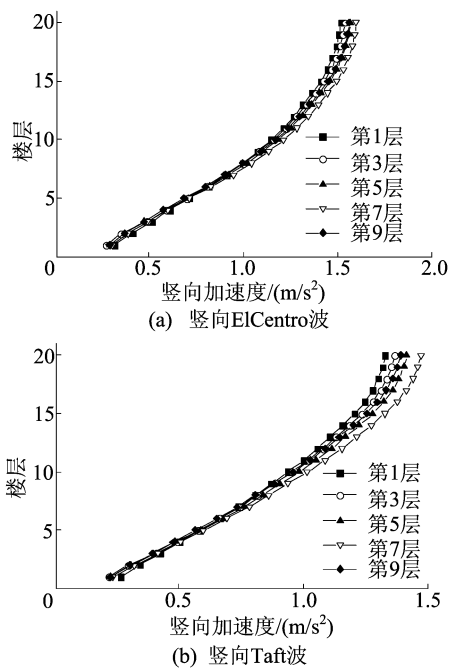


图 3 3 种竖向地震波作用下最大楼层竖向加速度

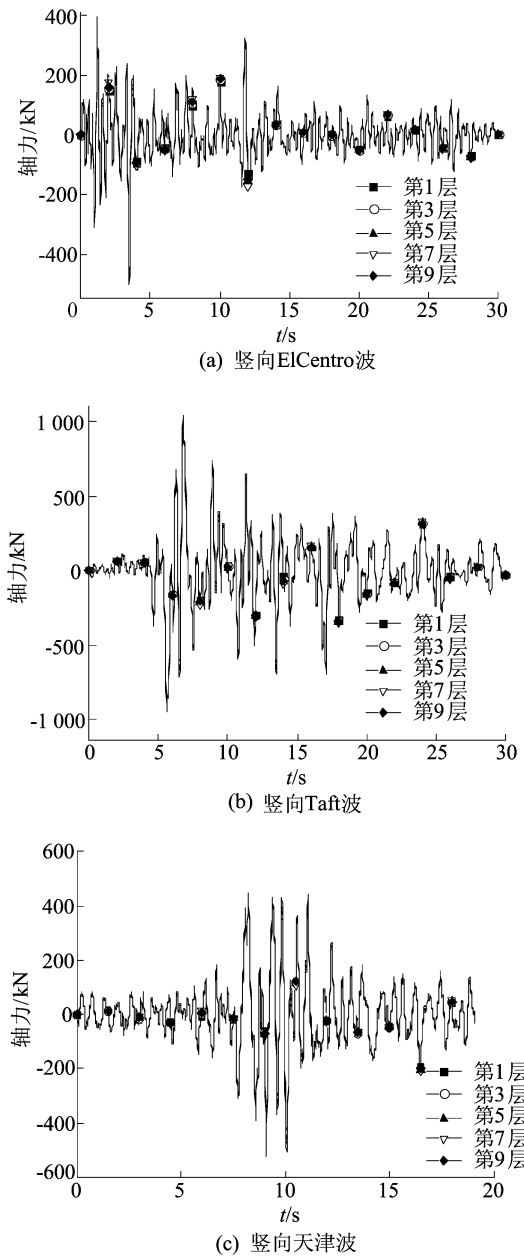


图 4 3 种竖向地震波作用下基底边柱轴力时程曲线

从图 3、图 4 可以看出:

1) 竖向地震作用下,楼层越高,结构的楼层竖向加速度越大,顶层的竖向加速度比一层的竖

向加速度大 85%左右,说明顶层部位易受鞭梢效应的影响从而增大楼层竖向加速度。

2) 隔震层位于第 7 层及以下时,隔震层位置升高,楼层竖向加速度和基底轴力均逐渐增大。但当隔震层位于第 9 层时,相较于隔震层位于第 7 层,楼层竖向加速度最大减小了 6.3%,基底轴力最大减小了 5.9%,说明在竖向地震作用下,隔震层上下部分结构的刚度变化会影响结构的楼层加速度和基底轴力,当上下部分刚度相差不大时,楼层加速度和基底轴力会有一定程度的降低。

3) 竖向 ElCentro 波、竖向 Taft 波和竖向天津波作用下的最大基底边柱轴力分别为 504、1 032、522 kN,说明在地震波加速度幅值相同的情况下,地震波的频率与结构的自振频率相近时,会产生结构基底轴力增大的现象,因此在抗震设计中尽量使结构的自振频率避开对应区域的多遇地震频率的范围,防止出现放大基底轴力的现象。

5 结 论

本文采用 Newmark 法基本理论对高层结构的竖向地震作用进行模拟,并用 ANSYS 有限元软件建立 20 层钢框架 Benchmark 有限元数值模型。分析隔震层分别位于第 1 层、第 3 层、第 5 层、第 7 层和第 9 层时竖向地震作用对楼层竖向位移、楼层位移角、楼层竖向加速度和基底轴力等竖向动力反应的影响,得到如下结论。

1) 3 种竖向地震作用下,层间隔震结构对高层结构的楼层竖向位移和楼层位移角的控制效果不理想,甚至会有不同程度的增大,但对基底轴力具有一定的控制效果。

2) 在隔震层位于第 7 层及以下时,随着隔震层位置的升高,高层结构的楼层竖向加速度和基底轴力均逐渐增大。但是当隔震层位于第 9 层

时,相较于隔震层位于第 7 层,楼层竖向加速度和基底轴力均会有一些减小。

3) 竖向 ElCentro 波、竖向 Taft 波和竖向天津波作用下的最大基底边柱轴力差别较为明显,因此地震波频率是影响结构基底轴力的重要因素。

[参 考 文 献]

- [1] 龚春玉. 竖向与水平地震作用下带 PSRC 空腹桁架转换层框架结构抗震性能分析[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [2] 邱文华,浦玉炳,张乾坤,等. 考虑竖向地震作用的拱式廊桥的地震响应分析[J]. 世界地震工程,2022,38(2):169-180.
- [3] 白国良,郝彬. 竖向地震作用下钢-钢筋混凝土塔式组合结构抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2019,52(3):12-19.
- [4] CHEN S X, HUANG Y Q. Vertical seismic analysis of roof truss in indonesia[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804(4):1-6.
- [5] SITI M A R, MOHD Z A M Z, WAN M S W O, et al. Assessment of reinforced concrete building with soil structure interaction effect under vertical earthquake[J]. Materials Science Forum, 2016, 3950(857):331-336.
- [6] 段绍伟,陈伯望. 结构隔震技术及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2017:12-16.
- [7] 孙肇凯. 框架结构基础隔震设计关键技术及工程应用研究[D]. 济南:山东建筑大学,2019.
- [8] 阎启,傅晋申,周建龙. 上海徐泾车辆段上盖高层结构层间隔震设计[J]. 建筑结构,2022,52(9):132-138,103.
- [9] ZHANG S G, HU Y C, LI S H, et al. Study on seismic response characteristics of the interlayer isolation structure[J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 23(8):1765-1784.
- [10] 涛涛. 地震作用下附设 TMD 的混合层间隔震体系振动控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [11] 欧进萍. 结构振动控制-主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003:496-509.

(责任编辑 张 镔)

(上接第 372 页)

- [14] SWENSON S, WAHR J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(8):L08402.
- [15] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al. Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D22):D22108.
- [16] GHIL M, ALLEN M R, DETTINGER M D, et al. Advanced spectral methods for climatic time series[J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(1):1-41.
- [17] LI W, WANG W, ZHANG C, et al. Bridging terrestrial

water storage anomaly during GRACE/GRACE-FO gap using SSA method; a case study in China[J]. Sensor, 2019, 19(19):4144.

- [18] HASSANI H, MAHMOUDVAND R, ZOKAE M. Separability and window length in singular spectrum analysis[J]. Comptes Rendus Mathématique, 2011, 349(17/18):987-990.
- [19] HSIEH W W. Nonlinear multivariate and time series analysis by neural network methods[J]. Reviews of Geophysics, 2004, 42(1):RG1003.

(责任编辑 张 镔)